

نیترژن زدایی جذبی از سوخت به کمک جاذب زیستی تهیه شده از پوست سبز گردو

امین علمداری^{۱*}، صدرا رستمی^۲، عباس آقایی نژاد میبیدی^۳

۱- استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، a.alamdari@urmia.ac.ir

۲- کارشناسی، مهندسی شیمی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، sadrarostami.1918@gmail.com

۳- دانشیار، مهندسی شیمی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، a.ghaeinejad@urmia.ac.ir

چکیده: هدف از این پژوهش مطالعه اثر کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو بر فعالیت فرآیند جذب سطحی برای حذف ترکیبات نیترژی ایندول و کینولین از سوخت مدل است. جاذب سنتز شده به کمک روش‌های تعیین مشخصات XRD، FTIR و BET تحلیل شد. پارامترهای فرآیندی از جمله زمان، دما، غلظت اولیه ترکیب نیترژی و دوز جاذب بر فرآیند نیترژن زدایی جذبی بررسی شد. نتایج فرآیند جذب سطحی نشان داد که جاذب کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو، ۲۰۰ ppm ایندول و کینولین را در مدت زمان شش ساعت، با مقدار جاذب ۰/۰۵ g بر ۱۰ ml سوخت نرمال - هپتان حاوی کینولین و ایندول در دمای ۲۵ °C به ترتیب به میزان ۴۲/۲۶ و ۳۷/۶۸ mg.g⁻¹ حذف می‌کند. برای بررسی سینتیک جذب از مدل‌های سینتیکی شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم استفاده شد، در حالی که از همدمای جذب برای ارزیابی داده‌های تعادلی استفاده شد. مشخص شد که جذب ترکیبات نیترژی توسط کربن فعال سنتز شده بهترین تناسب با همدمای لانگمویر برای کینولین و ایندول با حداکثر ظرفیت جذب ۳۹/۵۲ و ۴۴/۶۴ mg.g⁻¹ دارد. براساس داده‌های تجربی، مدل شبه مرتبه دوم بهترین برازش را برای کینولین و ایندول با رگرسیون خطی (R^2) ۰/۹۹۸۹ و ۰/۹۹۹۹ نشان داد. از مطالعات همدمای و سینتیک جذب ثابت شد که کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو پتانسیل زیادی در حذف ترکیبات نیترژی نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: نیترژن زدایی، ایندول، کینولین، سوخت، کربن فعال، پوست سبز گردو.

۱- مقدمه

سوخت‌های فسیلی حدود ۹۰٪ از منبع انرژی جهان را تشکیل می‌دهند [۱]. با توجه به اینکه جمعیت جهان و به طبع آن مصرف سوخت به طور پیوسته رو به افزایش است، امروزه یکی از چالش‌های بزرگ، بهینه‌سازی مصرف سوخت‌های فسیلی و مهم‌تر از آن پایداری محیط زیست می‌باشد [۲، ۳]. زیرا سوخت‌های فسیلی به خودی خود به میزان قابل توجهی حاوی مواد آلاینده می‌باشند که در هنگام سوختن، ممکن است به سلامتی انسان و محیط زیست آسیب برسانند [۱]. در نتیجه حذف این آلاینده‌ها قبل از استفاده از سوخت، از اهمیت خاصی برخوردار است.

ترکیبات نیترژن دار و گوگرد دار از اصلی‌ترین آلاینده‌های موجود در سوخت هستند [۲] که پس از احتراق به SO_x و NO_x تبدیل می‌شوند که علاوه بر گرمایش کره زمین و اثرات بسیار نامطلوب بر انواع گونه‌های جانوری و گیاهی، منجر به بارش باران‌های اسیدی نیز می‌گردند [۲، ۴، ۵]. همچنین، آلاینده‌های نیترژی و گوگردی موجود در سوخت خودروها، با مسموم کردن کاتالیست‌ها، باعث کاهش کارایی آن‌ها می‌شوند [۲] و در فرآیندهای پالایش سوخت نیز موجب زنگ‌زدگی و خوردگی تجهیزات پالایشگاهی و انسداد

خطوط لوله می‌شوند [۱]. از این رو برای جلوگیری و مقابله با معضلات و اثرات نامطلوبی که به دلیل انتشار این ترکیبات رخ می‌دهند، روز به روز قوانین سخت گیرانه‌تری اعمال می‌شود [۵]. به دلیل واکنش پذیری بسیار پایین ترکیبات نیتروژن دار نسبت به ترکیبات گوگرد دار، نیتروژن زدایی نسبت به گوگرد زدایی به مراتب دشوارتر است [۶]. ترکیبات نیتروژن دار در رقابت با ترکیبات گوگرد دار مکان‌های فعال کاتالیست را اشغال کرده و کارکرد کاتالیست را مختل می‌کنند، به همین دلیل در فرآیندهای پالایش، حذف ترکیبات نیتروژن دار بایستی قبل از حذف ترکیبات گوگرد دار انجام شود [۷، ۸]. بنابراین، در گام اول در پالایش سوخت، حذف ترکیبات نیتروژن دار اهمیت بیشتری دارد [۱].

ترکیبات نیتروژن دار عمدتاً به دو دسته تقسیم بندی می‌شوند؛ دسته اول (بازی) دارای حلقه‌های ۶ عضوی هستند مانند کینولین، تتراهیدروکینولین، آکریدین، آنیلین، پیریدین و مشتقات آن‌ها؛ دسته دوم (خنثی) نیز دارای حلقه‌های ۵ عضوی هستند مانند کاربازول، ایندول، پیرول و مشتقات آن‌ها [۱، ۸]. تا به امروز تلاش برای حذف ترکیبات نیتروژن دار و پالایش سوخت، از روش‌های مختلفی صورت گرفته است [۵] مانند: نیتروژن زدایی استخراجی (استخراج تبادل یونی اسیدی و استخراج مایع-مایع با کربوکسیلیک اسید) [۱، ۷، ۸]، نیتروژن زدایی زیستی [۱، ۷]، نیتروژن زدایی اکسایشی [۱، ۷] و نیتروژن زدایی جذبی [۱]. در صنعت روش نیتروژن زدایی هیدروژنی استفاده می‌شود که علاوه بر هیدروژن گران قیمت، نیازمند دمای بالا، فشار بالا، کاتالیست‌های فعال تر و راکتورهای بزرگ تر است و از این رو یک فرآیند پرهزینه و انرژی بر تلقی می‌شود [۲-۵، ۹]. بنابراین ارائه یک روش جایگزین، کارآمد و مقرون به صرفه برای حذف ترکیبات نیتروژن دار از سوخت بسیار حائز اهمیت است [۹]. از میان روش‌های مطالعه شده، نیتروژن-زدایی جذبی را شاید بتوان یک روش امیدوار کننده، جذاب و نوید بخش تلقی نمود [۱، ۱۰]. زئولیت‌های Cu(I)-Y، کربن‌های فعال، کربن‌های میکرو متخلخل، سیلیس-آلومیناهای حاوی HCl، آلومیناهای فعال، جاذب‌های مبتنی بر Ni، رزین‌های تبادل یونی، مزوسیلیکا، NiMOs، Ti-HMS همگی جاذب‌هایی هستند که تا به حال برای حذف ترکیبات نیتروژن دار از سوخت مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲، ۳، ۵، ۸].

امروزه کربن فعال به یکی از پرکاربردترین مواد جاذب به دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فردی مانند دسترسی آسان، تاثیر خنثی بر محیط زیست، روش تولید ساده و ساختار بسیار متخلخل، تبدیل شده است [۱۶]. عوامل مختلفی مانند اندازه منافذ، مساحت سطح، قطبیت، pH محلول و حلالیت بر میزان ظرفیت جذب کربن فعال تاثیر گذار هستند [۱۷]. علی رغم اینکه کربن‌های فعال (دانه‌ای یا پودری) به طور ویژه دارای قابلیت جذب آلاینده‌های آلی هستند، اما به دلیل هزینه بالا استفاده از آن‌ها محدود شده است [۱۸]. در نتیجه از نظر اقتصادی، استفاده از پیش‌سازهای جدید که ارزان بوده و در مقادیر فراوان در دسترس باشند، یک چالش مهم در تولید تجاری کربن فعال است [۱۹]. از بین گزینه‌های مختلف استفاده از ضایعات کشاورزی و تبدیل آن‌ها به محصولات با ارزش، روش مقرون به صرفه‌ای برای تولید کربن فعال می‌باشد. ایران با تولید ۱۰ درصد گردو در بازار سومین تولیدکننده بزرگ گردو در جهان است [۲۰]، بنابراین پوست گردو می‌تواند به عنوان منبع جایگزین برای تولید کربن فعال مورد استفاده قرار گیرد. سالانه مقادیر زیادی پوست سبز گردو به عنوان زائدات دفع می‌شود و از آنجا که مطالعات دیگران نشان داده است که این دسته از زائدات دارای گروه‌های عاملی قوی از قبیل OH و CO هستند که این گروه‌های عاملی در جذب مواد آلی می‌توانند نقش داشته باشند [۲۱].

در این مطالعه حذف جذبی ترکیبات نیتروژنی ایندول و کینولین از یک سوخت مدل به کمک کربن فعال تهیه شده از پوست سبز گردو به عنوان یک جاذب زیستی، مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات کربن فعال سنتز شده با آنالیزهای تعیین مشخصات XRD، FT-IR و BET تعیین شد. پارامترهای مختلفی از جمله اثر زمان، دما، غلظت اولیه ترکیب نیتروژنی و دوز جاذب به عنوان پارامترهای طراحی فرآیند بررسی شد. همچنین همدم‌های تعادل جذب و پارامترهای سینتیکی در فرآیند تعیین شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

نرمال هپتان ($n-C_7H_{16}$)، به عنوان سوخت مدل با خلوص ۹۹٪ و اسید فسفریک (H_3PO_4) برای پیش‌فرآوری با خلوص ۸۵٪ از شرکت سیگما آلد ریچ خریداری شد. پوست سبز گردو از باغات کشاورزی در شهر ارومیه جمع‌آوری شد و به عنوان پیش‌ساز سنتز کربن فعال مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- سنتز کربن فعال

ابتدا به منظور حذف گرد و غبار و ناخالصی‌ها، پوست سبز گردو یکبار به صورت کامل با آب مقطر شست و شو داده شد و پس از آن به منظور خشک شدن، به مدت ۴۸ ساعت در دمای آزمایشگاه، قرار گرفت. سپس پوست سبز گردو با دستگاه آسیاب آزمایشگاهی پودر شده و با الک با اندازه (مش‌بندی) ۶۰۰ میکرون الک شد، تا تقریباً به اندازه یکنواخت برسند. فعال‌سازی پودرهای آماده شده به روش مشابهی با روش ارائه شده در مطالعه [۱۷] صورت گرفت، به گونه‌ای که H_3PO_4 موجود با غلظت ۸۵ درصد وزنی، تا ۷۰ درصد وزنی رقیق شد، سپس ۵۰ گرم از پیش‌ساز آماده شده در ۱۰۰ میلی‌لیتر از اسید رقیق شده و به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد خیسانده شد (نسبت اشباع ۰/۶۸). سپس توده‌های مرطوب داخل بوته چینی ریخته شد و به منظور کربنه شدن به مدت ۲ ساعت در کوره الکتریکی با دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. محصولات فعال شده به طور مکرر با آب مقطر داغ شسته شدند تا H_3PO_4 حذف شود. این فرآیند تا زمانی ادامه یافت که pH محلول حاصل به مقدار ۶/۵ رسید و در نهایت نمونه با محلول NaOH نیم درصد وزنی شسته شد تا خنثی‌سازی کامل انجام شود. هر گونه NaOH باقیمانده از طریق شستشوی بیشتر با آب مقطر شسته شد. نمونه‌های نهایی در دمای ۳۸۳ کلوین به مدت ۲۴ ساعت خشک و در خشک‌کن نگهداری شدند.

۲-۳- مشخصه‌یابی مواد

برای تجزیه و تحلیل ساختار بلوری کربن فعال سنتز شده، الگوهای پراش اشعه ایکس (XRD) (Shimadzu, XRD-6000، ژاپن) با تابش Cu-K α مورد استفاده قرار گرفت. طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR) (Thermo, Avatar، آمریکا) به منظور تعیین گروه‌ها و عامل‌های سطحی کربن فعال سنتز شده، انجام شد. به منظور بررسی مشخصات سطحی، تخلخل و سطح ویژه جاذب‌های مورد مطالعه از آنالیز BET (Sorp, Bel، ژاپن) استفاده شد.

۲-۴- ارزیابی عملکرد جاذب

سوخت مدل، از انحلال ۱۰۰۰۰ ppm ترکیب نیتروژن دار (ایندول یا کینولین) در نرمال هپتان، تهیه شد. غلظت ترکیب نیتروژن دار تا ۲۰۰ ppm کاهش داده شد تا ظرفیت جذب سطحی در شرایط مختلف فرآیندی اندازه‌گیری شود. جاذب به میزان ۰/۰۵ g، به ml

۱۰ از سوخت مدل آماده شده افزوده شد. جذب سطحی تحت فشار اتمسفری و دمای آزمایشگاه (۲۵C)، به مدت ۳۶۰ دقیقه انجام شد. تنظیم دما به کمک گرمکن الکتریکی مجهز به همزن مغناطیسی، دماسنج و حمام روغن انجام شد. پس از پایان فرآیند جذب سطحی، محلول با فیلتر سرنگی (PTFE, hydrophobic, 0.5 μm) از جامد جدا شد و با استفاده از تحلیل طیف سنج UV-UV (1800, Shimadzu, Japan) تجزیه و تحلیل شد. جذب‌های UV در طول موج ۳۱۳ و ۲۸۷ نانومتر برای تعیین غلظت‌های کینولین و ایندول استفاده شد. تعیین ظرفیت جذب ترکیبات نیتروژن‌دار از سوخت، با استفاده از رابطه (۱) صورت گرفت:

$$Q_t = \frac{(C_i - C_f)V}{m} \quad (1)$$

که در آن C_i غلظت اولیه، C_f غلظت نهایی، Q_t مقدار جذب شده (mg/g) در زمان t ، V حجم محلول (mL) و m جرم جاذب (g) می‌باشد.

۲-۵-۲- همدمای جذب سطحی

به منظور مقایسه کمی رفتار جاذب در فرآیند جذب سطحی نیاز است که رابطه مناسبی برای نشان دادن همبستگی تعادل جذب تعیین شود. از این رو همدماهای جذب به عنوان روابط تعادلی که توزیع ماده جذب شونده بین دو فاز را برای یک فرآیند خاص جذب مشخص می‌کنند، بررسی می‌شوند [۲۲]. معادلات همدمای که در دمای ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرند با مشخص نمودن نتایجی از قبیل ثوابت همدمای و داده‌های همدمای، در طراحی و مدل‌های سینتیک و انتقال جرم، مفید واقع می‌شوند [۲۳].

۱-۲-۵-۲- مدل همدمای لانگمویر

مدل همدمای لانگمویر از طریق رابطه (۲) بررسی می‌شود [۲۴]:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q_0} + \frac{1}{Q_0 b} \quad (2)$$

که در این معادله C_e غلظت تعادلی ماده جذب شونده (mg/L) و q_e مقدار جذب شده در حالت تعادل (mg/g)، Q_0 حداکثر میزان ظرفیت جذب با واحد (mg/g) و b ثابت لانگمویر با واحد (L/mg) می‌باشند. ثابت تعادل همدمای لانگمویر را می‌توان به صورت یک ثابت بدون بعد که تحت عنوان فاکتور جداسازی (R_L) مشهور است به صورت معادله ۳ بیان نمود [۲۳، ۲۵].

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \quad (3)$$

که در آن، R_L ضریب جداسازی و C_0 غلظت اولیه ماده جاذب (mg/L) است. در مدل همدمای لانگمویر، جذب به صورت تک لایه‌ای و سطح جاذب از نظر انرژی به صورت همگن در نظر گرفته می‌شود، به طوری که هر مولکول دارای آنتالپی ثابت بوده و فرآیند جذب در تعداد ثابتی از مکان‌های یکسان و معادل، بدون برهمکنش جانبی بین مولکول‌های جذب‌شده، حتی در مکان‌های مجاور، رخ می‌دهد و همه مکان‌ها میل ترکیبی یکسانی برای جذب دارند [۲۲، ۲۶].

۲-۲-۵-۲- مدل همدمای فرن‌دلیچ

مدل همدمای فرن‌دلیچ از رابطه (۴) بررسی می‌شود [۲۳، ۲۴].

$$q_e = K_F C_e^n \quad (4)$$

که در رابطه (۴) ثابت جذب فرندلیچ بر حسب $\left(\frac{mg}{g}\right) \cdot \left(\frac{L}{mg}\right)^{\frac{1}{n}}$ است که ظرفیت جذب را مشخص می‌کند و n توان

فرندلیچ است، که نشانگر شدت جذب یا ناهمگنی سطح می‌باشد که اگر در بازه مقادیری بین ۱ تا ۱۰ قرار گیرد، جذب مطلوب است. برای این مدل همدم جذب صرفاً به یک لایه محدود نمی‌شود، سطح جذب ناهمگن در نظر گرفته شده و معمولاً برای سیستم‌های آلی ناهمگن با توزیع غیریکنواخت گرمای جذب اعمال می‌شود [۲۷، ۲۳]. این مدل برای سیستم‌هایی با غلظت بالا قابل استفاده نمی‌باشد [۲۴].

۲-۶- سینتیک فرآیند جذب سطحی

به منظور بررسی ساز و کار فرآیند نیتروژن‌زدایی جذبی روابط سینتیکی شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم بررسی شد.

۲-۶-۱- مدل شبه مرتبه اول

یکی از پرکاربردترین روابط سینتیکی، مدل سینتیکی شبه مرتبه اول است و معمولاً برای جذب فیزیکی مناسب است. مدل سینتیکی شبه مرتبه اول براساس رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$\frac{dq}{dt} = k_L (q_e - q) \quad (5)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه (۵) و بررسی شرایط مرزی، رابطه (۶) و پس از ساده‌سازی رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$\ln \frac{(q_e - q)}{q_e} = -k_L t \quad (6)$$

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_L t}) \quad (7)$$

در روابط فوق، q_t ، q_e و k_L به ترتیب ظرفیت جذب در زمان t (mg/g)، ظرفیت جذب در زمان تعادل (mg/g) و ثابت سرعت سینتیکی (L/min) است [۲۷].

۲-۶-۲- مدل سینتیک شبه مرتبه دوم

در مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم، فرآیند جذب همراه با انجام واکنش شیمیایی در نظر گرفته می‌شود، که رابطه (۸) بیانگر معادله این مدل سینتیکی می‌باشد [۲۴].

$$\frac{dq}{dt} = K_1 (q_e - q)^2 \quad (8)$$

با انتگرال‌گیری از معادله فوق و اعمال شرایط مرزی در $q=0$ ، $t=0$ و در $q=q_e$ ، $t=t$ معادله (۹) به دست می‌آید [۲۴].

$$\frac{1}{q_e - q} = \frac{1}{q_e} + K_2 t \quad (9)$$

در نهایت با ساده‌سازی معادله (۹)، رابطه نهایی (۱۰) که معادله شبه مرتبه دوم است حاصل می‌شود [۲۴].

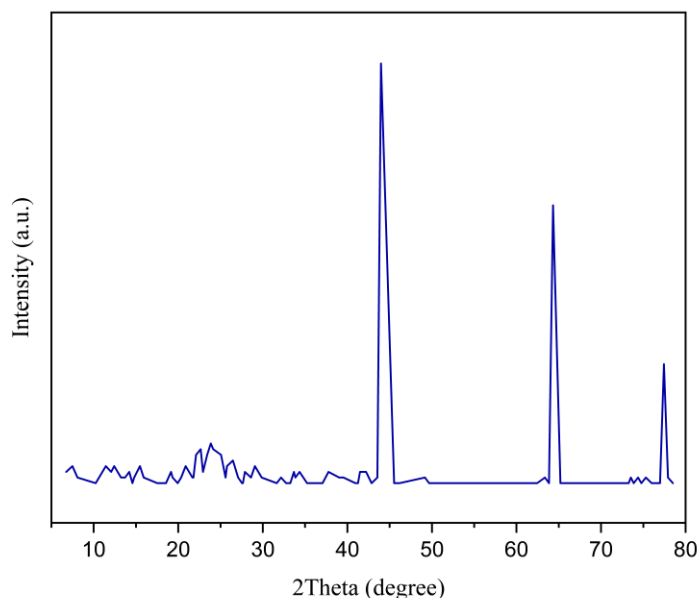
$$q_t = \frac{K_2 q_e^2 t}{1 + K_2 q_e t} \quad (10)$$

در رابطه نهایی، q_t ظرفیت جاذب در زمان t (mg.g^{-1})، t زمان (min) و q_e ظرفیت جاذب در زمان تعادل (mg.g^{-1}) می‌باشند. K_2 نیز ثابت سرعت مدل شبه مرتبه دوم است.

۳- نتایج

۳-۱- تعیین مشخصات جاذب

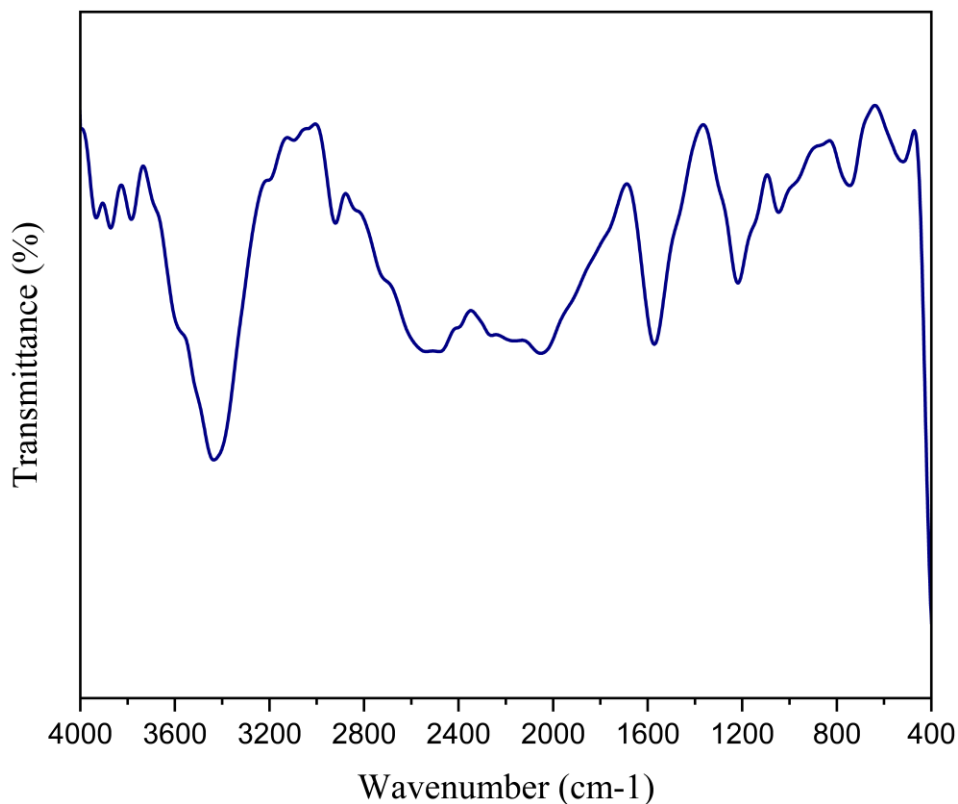
پراش اشعه ایکس برای تایید فاز و ساختار بلوری نمونه انجام شد و نتیجه در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو با پیک‌های غالب در 2θ برابر با 26.045° ، 43.045° و 46.322° به ترتیب متناظر با صفحات کریستالی ارتورمبیک (۱۱۱)، (۱۰۰) و (۱۱۰) هستند. علاوه بر این پیک‌ها، تعدادی پیک در 2θ برابر با 15.013° ، 24.016° ، 23.0186° و 31.064° متناظر با صفحات (۲۰۲)، (۱۱۳)، (۲۱۳) و (۰۲۱) وجود دارد که به صفحات کریستالی مونوکلینیک استیلن دی فنیل مربوط می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در مراحل کربونیزاسیون و آماده‌سازی کربن فعال آماده‌سازی شده از پوست سبز گردو، مقداری از سلولز پوست سبز گردو به کربن تبدیل نشده است [۲۸ و ۲۹].



شکل ۱- الگوهای XRD کربن فعال سنتز شده.

ظرفیت جذب کربن فعال به وجود بسیاری از گروه‌های عاملی شیمیایی در سطح نیز بستگی دارد. طیف FT-IR برای کربن فعال تهیه شده از پوست سبز گردو در شکل ۲ نشان داده شده است. برای کربن فعال، نوار پهن و مسطح در $3200-3600 \text{ cm}^{-1}$ می‌تواند

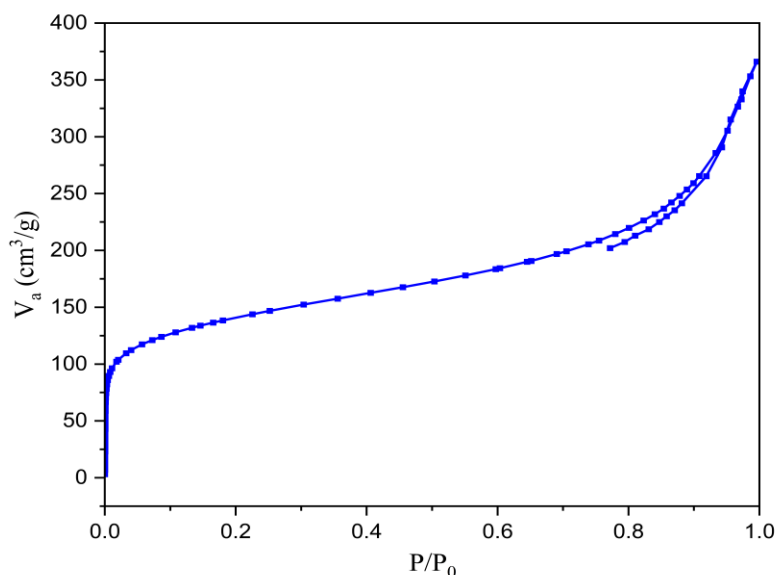
به ارتعاش کششی O-H مربوط باشد [۳۰] و در 2923 ، 1933 و 841 به کشش C-H اشاره می شود [۳۱ و ۳۲]. قله‌های 2338 و 2362 سانتی‌متر مربع، گروه‌های C=C را به دلیل کشش متقارن یا نامتقارن نوار آلیفاتیک نشان می‌دهند که در طول کربن‌سازی افزایش یافته است [۳۰]. پیک‌های بین $1750-1600$ cm^{-1} به پیوند C=O (پیوند کربونیل) در کربوکسیلیک اسید، کتون‌ها و آلدئید اشاره می‌کنند. پیک‌های مشاهده‌شده در $1380-1000$ سانتی‌متر، ارتعاش CO را در گروه‌های فنل و آلکوکسی نشان می‌دهند [۳۱]. پیوند C-H در آلکن‌ها توسط پیک‌هایی در $1000-700$ cm^{-1} تشخیص داده می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که کربن فعال تهیه شده غنی از گروه‌های عاملی اسیدی است [۳۱]. فرآیند کربن‌سازی و فعال‌سازی یک حلقه آروماتیک یا ارتعاش کششی C=C ایجاد کرده است که در حدود 1400 cm^{-1} مشاهده می‌شود [۳۳]. افزایش در پیک در حدود 1400 cm^{-1} منجر به افزایش ظرفیت جذب می‌شود. هنگامی که کربن فعال به عنوان یک جاذب عمل می‌کند، برخی از تعاملات جذب از جمله پیوند هیدروژنی و جاذبه الکترواستاتیکی بین این گروه‌های عاملی و جاذب وجود دارد که به معنی جذب گسترده‌تر و ظرفیت جذب بیشتر است [۳۳]. نوار واقع در حدود 1458 cm^{-1} به گروه یون کربوکسیلات نسبت داده شد [۳۰].



شکل ۲- طیف FT-IR برای کربن فعال سنتز شده.

ظرفیت جذب کربن فعال به مساحت سطح و حجم منافذ آن مربوط می‌شود. سطح و حجم منافذ در طول فرآیندهای فعال‌سازی افزایش می‌یابد. شکل ایزوترم جذب می‌تواند اطلاعات کیفی در مورد فرآیند جذب و وسعت سطح در دسترس برای جاذب ارائه دهد. همدمای BET کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو در شکل ۳ نشان داده شده است. از شکل همدمای با توجه به طبقه بندی IUPAC، مشخصات همدمای را می‌توان به عنوان نوع I طبقه بندی کرد که نشان دهنده ساختارهای ریز منافذ متراکم است و

نمودار جذب تک لایه را نشان می دهد. در فشارهای نسبی کم، یک افزایش سریع در همدمای جذب-واجذب مشاهده می شود که به دنبال آن یک فلات تقریباً افقی در فشارهای نسبی بالاتر، نشان دهنده مواد جامد بسیار ریز متخلخل است. عدم وجود حلقه پسماند نشان دهنده عدم وجود مزوحفره است و نشان می دهد که کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو عمدتاً حاوی ریز منافذ با سهم کوچکی از مزوحفره است [۳۳]. خواص سطحی کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو در جدول ۱ نشان داده شده است. مشخص شد که مساحت سطح، حجم منافذ کل و اندازه منافذ کربن فعال به دست آمده به ترتیب $502/27 \text{ m}^2/\text{g}$ ، $0.4086 \text{ cm}^3/\text{g}$ و $4/41 \text{ A}$ و $0/5541$ بود. تکامل ساختار منافذ با فعال سازی با اسید فسفریک به دلیل ماده شیمیایی باقی مانده در نمونه های کربنی شده است که بعداً شسته شده و منجر به تشکیل تخلخل در کربن ها می شود [۳۴]. مقدار خاکستر براساس استاندارد ASTM D-2866 تعیین شد و میزان آن $0/53$ درصد محاسبه شد. مقدار پایین خاکستر تولید شده بیانگر پتانسیل بالا برای تولید کربن فعال با کیفیت بالا است.



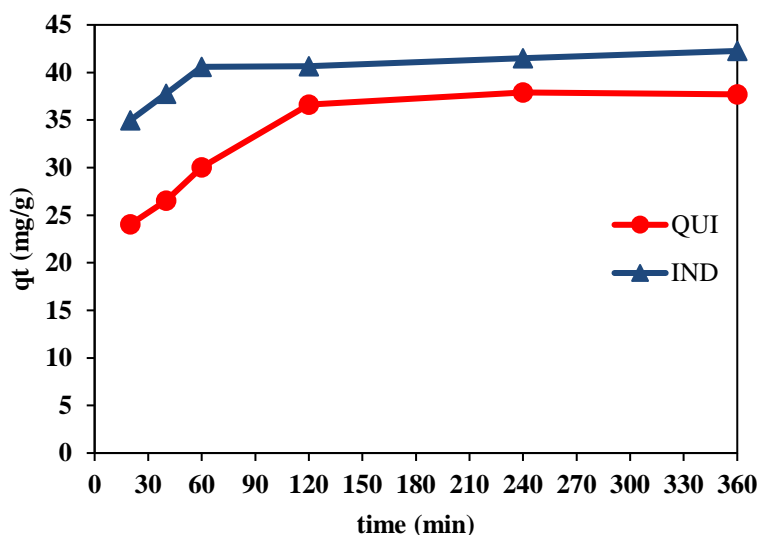
شکل ۳- همدمای جذب سطحی-دفع سطحی نیتروژن برای کربن فعال سنتز شده.

جدول ۱- تحلیل سطح ویژه برای کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو.

| نمونه | سطح ویژه (متر مربع بر گرم) | اندازه حفره (نانومتر) | حجم حفره (سانتی متر مربع بر گرم) | اندازه ذره (نانومتر) | حجم کلی حفره (سانتی متر مربع بر گرم) |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------|--------------------------------------|
| کربن فعال از پوست سبز گردو | 502/27 | 4/4127 | 0/4086 | 1/26 | 0/5541 |

۳-۲- اثر زمان تماس بر روی نیتروژن زدایی جذبی

به منظور ایجاد شرایط تعادل جذب و درک اثر مدت زمان جذب بر کمیت جذب شده، آزمایشات جذب در یک بازه زمانی شش ساعته انجام شد. زمان جذب سطحی یکی از مهم‌ترین عوامل در تعیین ماهیت و میزان جذب سطحی بر روی جاذب کربن فعال سنتز شده است، زیرا زمان تماس طولانی‌تر برای جذب سطحی به رفع انسداد ترکیبات ایندول و کینولین کمک می‌کند. گزارش شده است که زمان‌های تماس طولانی باعث افزایش دانسیته الکترونی و واکنش بیشتر $\pi-\pi$ می‌شود [۳۵]. سرعت جذب سطحی برای ایندول تا دقیقه ۶۰ و کینولین تا دقیقه ۱۲۰ با شدت بیشتری افزایش یافت و پس از آن تقریباً ثابت شد، که این امر به میزان بالای محل‌های جذب در لایه بیرونی جاذب‌ها در زمان‌های ابتدایی فرآیند مربوط می‌شود. همچنین، با افزایش زمان جذب، مکان‌های جذب جاذب‌ها به تدریج توسط ترکیبات ایندول و کینولین اشغال می‌شود و ظرفیت جذب پس از ۶ ساعت بدون تغییر قابل توجه به حد اشباع می‌رسد [۳۶]. محیط ایجاد شده توسط مکان‌های فعال کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو منجر به ظرفیت جذب $42/26$ ایندول و $37/68$ mg.g⁻¹ کینولین در ۳۶۰ دقیقه شد. با گذشت زمان در مرحله اولیه، تعداد زیادی مکان جاذب خالی است که در آن مولکول‌های حل شونده می‌توانند جذب شوند و پس از گذشت مدتی نیروهای دافعه بین فاز توده‌ای و مولکول‌های حل شونده و سطح جامد ایجاد می‌شوند که در نتیجه جذب مشکل می‌شود. همچنین، در ابتدای فرآیند جذب سطحی منافذ جاذب با مولکول‌های حل شونده اشباع می‌شود و در مرحله بعد مولکول‌های جذب شونده باید به داخل ریز منافذ نفوذ کنند و با مقاومت بالایی مواجه می‌شوند [۳۷].

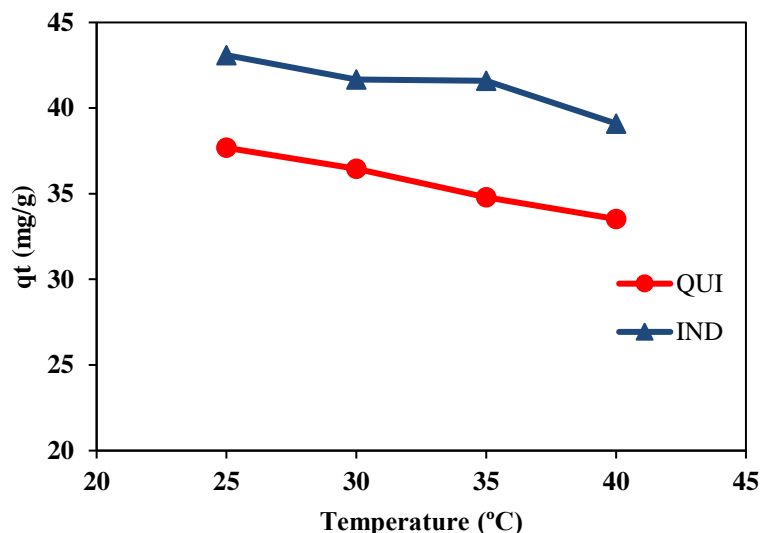


شکل ۳- اثر زمان جذب سطحی بر روی حذف کینولین و ایندول. ۰/۰۵ گرم جاذب، ۱۰ میلی لیتر محلول (۲۰۰ ppm)، و دمای ۲۵ درجه سانتی گراد.

۳-۳- اثر دمای جذب سطحی بر روی نیتروژن زدایی جذبی

شکل ۴ اثر دماهای مختلف را بر روی نیتروژن زدایی جذبی در محدوده دمای ۲۵ تا ۴۰°C در مدت زمان ۳۶۰ دقیقه و ۰/۰۵ g جاذب نشان می‌دهد. با توجه به شکل، افزایش دما منجر به کاهش ظرفیت جذب برای ترکیب ایندول و کینولین می‌شود، هر چند

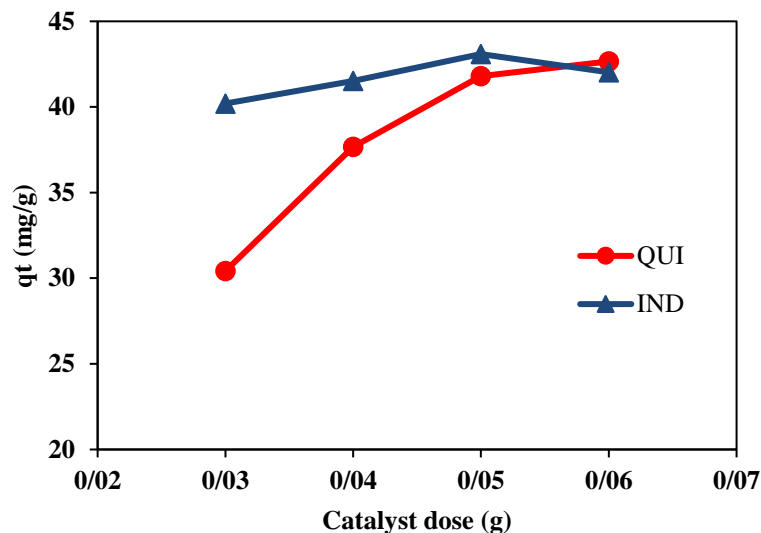
این کاهش ظرفیت با شدت زیادی همراه نبود. با افزایش دما از ۲۵ به ۴۰°C ظرفیت جذب ایندول از ۴۲/۲۶ به ۳۹/۰۹ mg.g⁻¹ جذب و برای کینولین از ۳۸/۶۸ به ۳۳/۵۲ mg.g⁻¹ کاهش یافت. پیرامون کربن فعال سنتز شده از پوست سبزی گردو در دمای ۲۵°C ظرفیت جذب برای ترکیب ایندول و کینولین به ترتیب ۴۲/۲۶ و ۳۷/۶۸ mg.g⁻¹ بود. افزایش دما تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقدار ظرفیت جذب سطحی ایجاد نکرد. از آنجاییکه فرآیند جذب سطحی فرآیندی گرمازا می‌باشد، افزایش دما جذب سطحی را ارتقا نمی‌دهد [۳۶]. دمای پایین در فرآیندهای صنعتی باعث کاهش هزینه‌ها و ایمنی فرآیند می‌شود.



شکل ۴- اثر دمای جذب سطحی بر روی تبدیل کینولین و ایندول، ۰/۰۵ گرم جذب، ۱۰ میلی لیتر محلول (۲۰۰ ppm)، و ۳۶۰ دقیقه زمان جذب سطحی.

۴-۳- اثر مقدار جذب بر روی نیتروژن زدایی جذبی

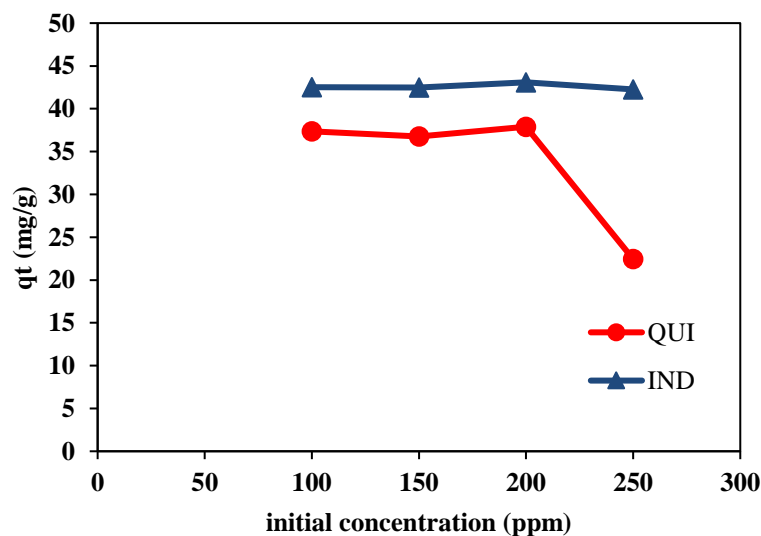
معمولاً، جذب سطحی با افزایش مقدار جذب افزایش می‌یابد، که این امر به دلیل افزایش تعداد مکان‌های فعال ایجاد شده برای جذب سطحی است [۳۸]. شکل ۵، اثر مقدار جذب را در محدوده دوز جذب ۰/۰۳ تا ۰/۰۶ g به ازای ۱۰ ml محلول بر روی حذف ایندول و کینولین نشان می‌دهد و دریافت می‌شود که افزایش مقدار جذب، فعالیت نیتروژن زدایی را ارتقا می‌دهد. ۰/۰۵ g جذب کربن فعال سنتز شده منجر به ظرفیت جذب ۴۳/۰۸ و ۴۱/۷۹ mg.g⁻¹ برای ایندول و کینولین شد. با افزایش دوز جذب از ۰/۰۳ تا ۰/۰۵، در ابتدا ظرفیت جذب افزایش یافت و پس از آن کاهش یافت. همچنین، برهمکنش بین ترکیب ایندول و جذب کربن فعال سنتز شده در مقایسه با کینولین مؤثرتر بود و برای حذف ترکیب ایندول در مقایسه با ترکیب کینولین به دوز جذب پایین تری نیاز بود. افزایش فعالیت با افزایش مقدار جذب به علت فراهم شدن مقادیر بیشتری مکان‌های فعال برای برهمکنش و جذب سطحی اجزای فعال است [۳۸].



شکل ۵- اثر مقدار جاذب بر روی تبدیل کینولین و ایندول، ۱۰ میلی لیتر محلول (۲۰۰ ppm)، و ۳۶۰ دقیقه زمان جذب سطحی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد.

۵-۳- اثر غلظت اولیه کینولین بر روی نیتروژن زدایی جذبی

شکل ۶، جذب سطحی ایندول و کینولین را برای غلظت‌های اولیه متفاوت ایندول و کینولین در محدوده غلظت ۱۰۰ تا ۲۵۰ ppm نشان می‌دهد. همچنان که از شکل ۶ مشاهده می‌شود، کربن فعال سنتز شده در غلظت‌های پایین‌تر (کمتر از ۲۰۰ ppm برای ایندول و کینولین) سرعت جذب کمتری دارد. با افزایش غلظت به ۲۰۰ ppm ظرفیت جذب مقدار کمی ارتقا یافته و در غلظت‌های بالاتر کاهش می‌یابد. این افزایش احتمالاً از آنجایی که گرادیان غلظت افزایش یافته است، ارتقا یافته است. با این حال، در غلظت‌های اولیه بالای کینولین و ایندول (بالاتر از ۲۰۰ ppm)، عملکرد جذب به دلیل ارتباط مولکول‌های ایندول و کینولین در مورد مکان‌های جاذب کاهش یافت [۳۹]. این روند معکوس را می‌توان به مانع فضایی یا تعامل دافعه بین ترکیبات نیتروژنی به دلیل کاهش فضای منافذ نسبت داد [۴۰].



شکل ۶- اثر مقدار کینولین و ایندول جذب شده بر روی جاذب در غلظت های مختلف کینولین (۰/۰۵ گرم جاذب، ۱۰ میلی لیتر محلول (۲۰۰ ppm)، و دمای ۲۵ درجه سانتی گراد).

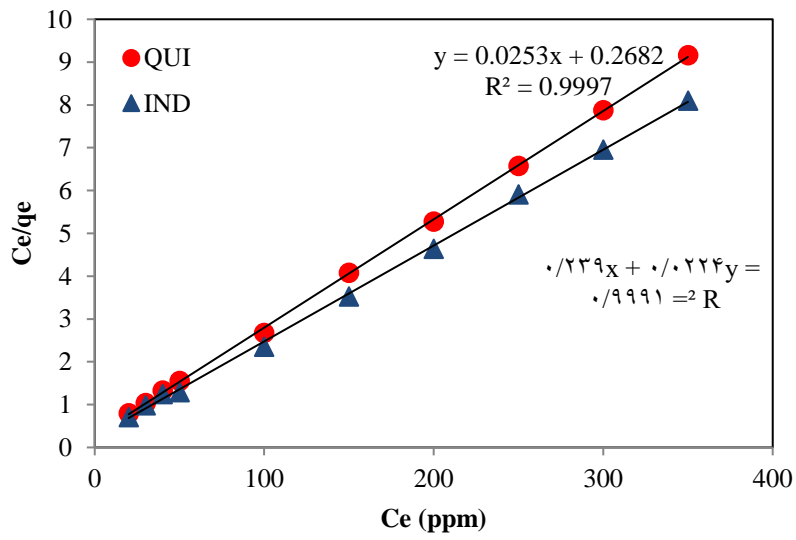
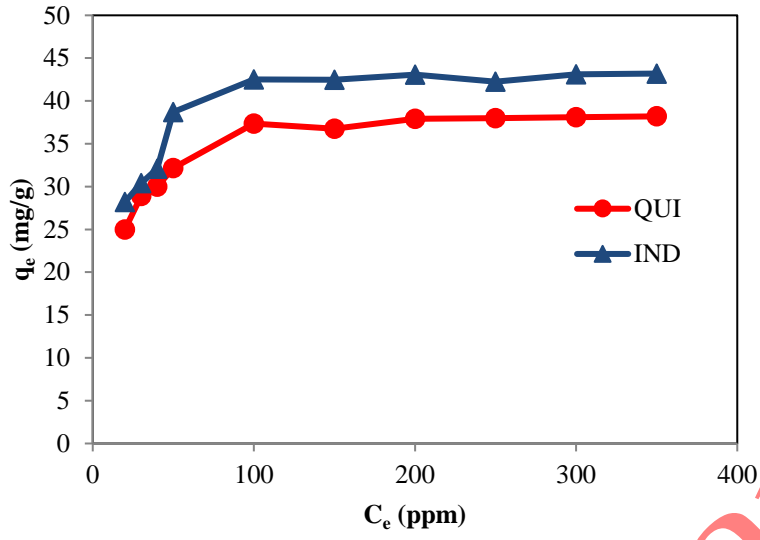
۳-۶- همدمای جذب سطحی

تجزیه و تحلیل داده‌های همدمای برای یافتن بهترین مدل برای جذب ترکیبات نیتروژنی ایندول و کینولین با استفاده از کربن فعال سنتز شده مهم است. برای مطالعه عملکرد تعادلی کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو، همدمای لانگمویر و فروندلیچ بررسی شدند. جدول ۲ نیز ثوابت همدمای لانگمویر و فروندلیچ را ارائه می‌دهد. براساس شکل ۷، ظرفیت جذب تعادلی با افزایش غلظت تعادلی ایندول و کینولین افزایش می‌یابد. شکل ۷ (الف) همدمای جذب سطحی را برای کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو برای هر دو ترکیب نیتروژنی ایندول و کینولین را نشان می‌دهد. به منظور یافتن مقدار R^2 ، Q_0 و K_L برای همدمای لانگمویر برای جذب ترکیب نیتروژنی ایندول و کینولین توسط کربن فعال سنتز شده، نمودار C/q_e در برابر q رسم شد. حداکثر ظرفیت جذب سطحی (q_m) با استفاده از همدمای لانگمویر موجود در شکل ۷ (ب) تعیین شد. حداکثر ظرفیت جذب سطحی ایندول و کینولین بر روی کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو به ترتیب $44/64$ و $39/52 \text{ mg.g}^{-1}$ بود. کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو، ایندول را به میزان بیشتری جذب کرده است. با این حال، نموداری از $\log Q_e$ در برابر $\log C_e$ برای همدمای فروندلیچ رسم شد. نموداری از $\log Q_e$ در برابر $\log C_e$ برای همدمای فروندلیچ رسم شد. تمام ثابت‌ها و ضرایب همبستگی در جدول ۲ خلاصه شده است. مقادیر R^2 از دو مدل همدمای اعمال شده برای جذب ترکیب نیتروژنی ایندول و کینولین توسط کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو به دست آمده است. مدل فروندلیچ بر پایه دو فرضیه استوار است. براساس فرض اول، ماده جذب شونده در چند لایه بر روی سطح جاذب جذب می‌شود و براساس فرض دوم، جاذب اشباع نشده و پیوند همیشگی بین ماده جذب شونده و جاذب وجود دارد [۴۱]. براساس مدل فروندلیچ، مقدار ثابت n در همدمای فروندلیچ برای ترکیب ایندول و کینولین به ترتیب $7/26$ و $6/77$ می‌باشد، از آنجاییکه این مقدار بین ۲ تا ۱۰ می‌باشد فرآیند جذب سطحی به خوبی انجام پذیرفته است.

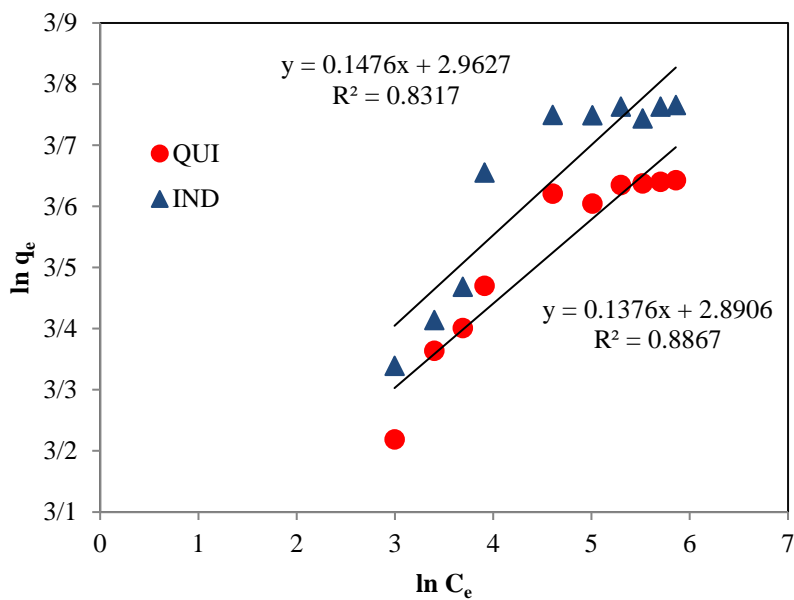
براساس نتایج موجود در جدول ۲، برای هر دو ترکیب نیتروژنی ایندول و کینولین، طبق مقادیر مربع خطاها (R^2) میزان انطباق نتایج تجربی با مدل‌های جذب لانگمویر و فروندلیچ مناسب می‌باشد. ترتیب مربع خطاها به صورت لانگمویر < فروندلیچ می‌باشد. بنابراین، می‌توان سطح هر دو جاذب را همگن و جذب را به صورت تک لایه فرض کرد به گونه‌ای که مولکول‌های جذب شده هیچ برهمکنشی با یکدیگر ندارند.

از جدول ۲ نیز می‌توان مشاهده کرد که همدمایی که می‌تواند برای نشان دادن و تناسب بهتر جذب نیتروژن توسط کربن فعال سنتز شده با پوست سبز گردو استفاده شود، همدمای لانگمویر برای کینولین و ایندول است. این به این دلیل است که محدوده مربوط به مقادیر R^2 همدمای لانگمویر و فروندلیچ برای کینولین به ترتیب $0/9997$ و $0/8317$ است. با این حال، محدوده مربوط به مقادیر R^2 همدمای لانگمویر و فروندلیچ برای ایندول به ترتیب $0/9991$ و $0/8867$ است. برای بررسی مطلوبیت مدل لانگمویر از فاکتور جداسازی (R_L) استفاده شد، با توجه به اینکه فاکتور جداسازی بین صفر تا یک می‌باشد، فرآیند جذب مطلوب خواهد بود.

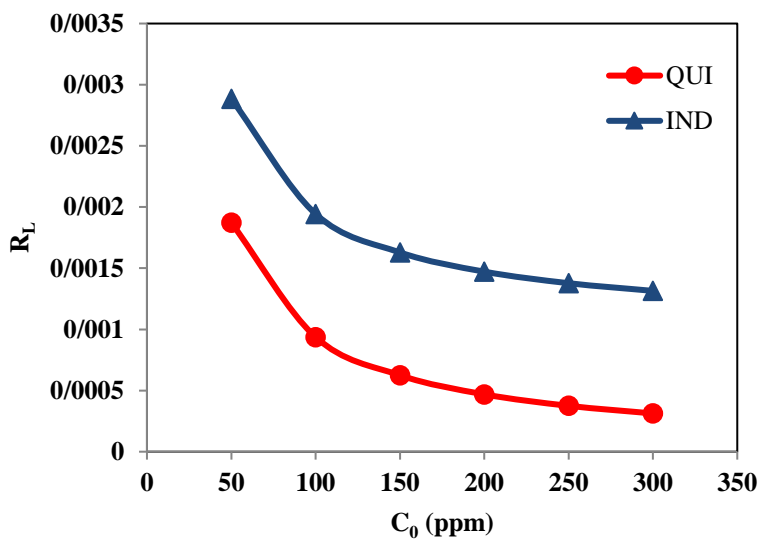
(الف)



ج



د



شکل ۷- الف) همدمای جذب سطحی، ب) نمودار لانگمویر، ج) نمودار فرنرندلیچ، د) فاکتور جداسازی پیرامون کربن فعال سنتز شده.

جدول ۲- پارامترهای همدمای جذب لانگمویر و فرنرندلیچ برای کربن فعال سنتز شده.

| مدل | پارامترهای مدل | ایندول | کینولین |
|----------|-----------------------|--------|---------|
| لانگمویر | K _L (L/mg) | ۱۰/۵۹ | ۱۰/۶۶ |

| | | | |
|---------------|---------------|--------------|----------|
| ۳۹/۵۲ | ۴۴/۶۴ | q_m (mg/g) | فروندلیج |
| ۰/۰۰۱۸-۰/۰۰۰۳ | ۰/۰-۰۰۱۳/۰۰۲۸ | R_L | |
| ۰/۹۹۹۷ | ۰/۹۹۹۱ | R^2 | |
| ۱۹/۱۷۶ | ۱۷/۸۴۶ | K_F (mg/g) | |
| ۶/۷۷ | ۷/۲۶ | N | |
| ۰/۸۳۱۷ | ۰/۸۸۶۷ | R^2 | |

بیشترین ظرفیت جذب سطحی کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو با جاذب‌های کربن فعال گزارش شده در پژوهش‌های پیشین مقایسه شد. جدول ۳ مقایسه‌ای از بیشترین ظرفیت جذب سطحی کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو با سایر کربن فعال‌های سنتز شده را ارائه می‌دهد.

جدول ۳- مقایسه بیشترین ظرفیت جذب سطحی کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو برای حذف ترکیبات نیتروژنی مختلف پژوهش‌های پیشین

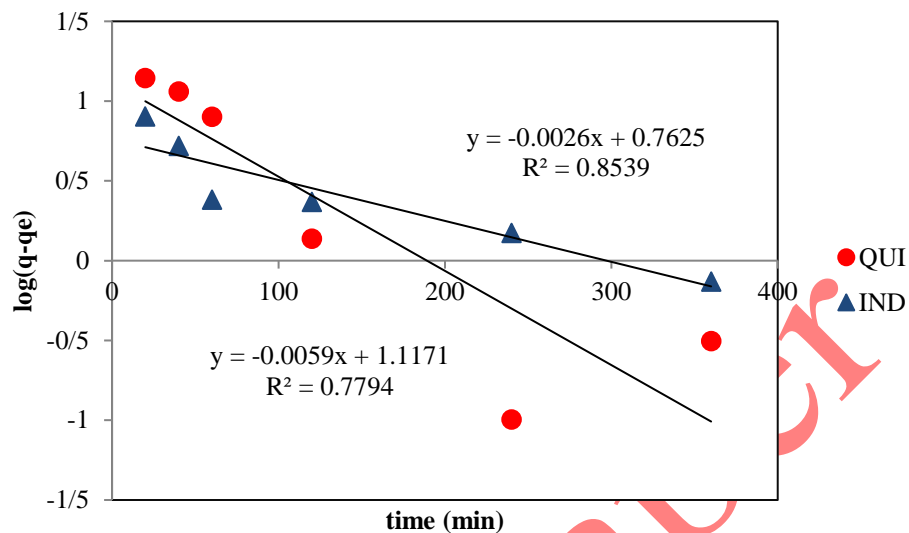
| مرجع | بیشترین ظرفیت جذب سطحی (میلی گرم / میلی مول بر گرم) | ترکیب نیتروژنی | سطح ویژه (متر مربع بر گرم) | جاذب |
|------|--|----------------|-------------------------------|--|
| [42] | ۰/۱۶ میلی گرم بر گرم | ایندول | | کربن فعال اصلاح شده با اسید سولفوریک (MAC) |
| | ۰/۱۳ میلی گرم بر گرم | کینولین | | |
| [43] | ۰/۶۹۸ میلی مول بر گرم | پیرول | ۳۵۴/۷۶ | کربن فعال گرانولی |
| | ۰/۳۶۴ میلی گرم بر گرم | ایندول | | |
| [44] | ۲/۸۵۷ میلی گرم بر گرم | ایندول | ۱۰۴۸/۷ | کربن فعال اصلاح شده با اکسیداسیون (OAC) |
| | ۸۵۷ میلی گرم بر گرم | کینولین | | |
| [45] | ۴۴/۳۷ میلی گرم بر گرم | ایندول | ۳۵۵ | کربن فعال گرانولی |
| [46] | ۲/۲۱ میلی مول بر گرم | کینولین | ۵۳۹ | کربن فعال گرانولی اصلاح شده با روی (Zn-GAC) |

| | | | | |
|-------------|------------------------|----------|--------|--|
| [47] | ۱/۴۱ میلی مول بر گرم | کینولین | ۵۵۳/۲ | کربن فعال گرانولی اشباع شده با نیکل (1%Ni-GAC) |
| [48] | ۱/۵۷۶۸ میلی گرم بر گرم | کینولین | ۱۸۲۹ | کربن فعال اکسید شده با پرسولفات آمونیوم AC-(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ |
| | ۱/۳۴۶۴ میلی گرم بر گرم | ایندول | | |
| | ۱/۰۶۵۹ میلی گرم بر گرم | کاربازول | | |
| [49] | ۱۱/۵ میلی گرم بر گرم | کینولین | ۹۹۵ | کربن فعال اصلاح شده با نانوذرات آهن |
| [50] | ۱۶۹/۴ میلی گرم بر گرم | کینولین | ۱۷۴ | کربن فعال گرانولی |
| | ۲۰/۳۷ میلی گرم بر گرم | پیریدین | | |
| [51] | ۰/۸۰۹۴ میلی گرم بر گرم | ایندول | ۵۰۲/۲۷ | کربن فعال اصلاح شده با هیدروکلریک اسید |
| | ۰/۴۷۰۸ میلی گرم بر گرم | کینولین | | |
| مطالعه حاضر | ۳۹/۵۲ میلی گرم بر گرم | کینولین | ۵۰۲/۲۷ | کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو |
| | ۴۴/۶۴ میلی گرم بر گرم | ایندول | | |

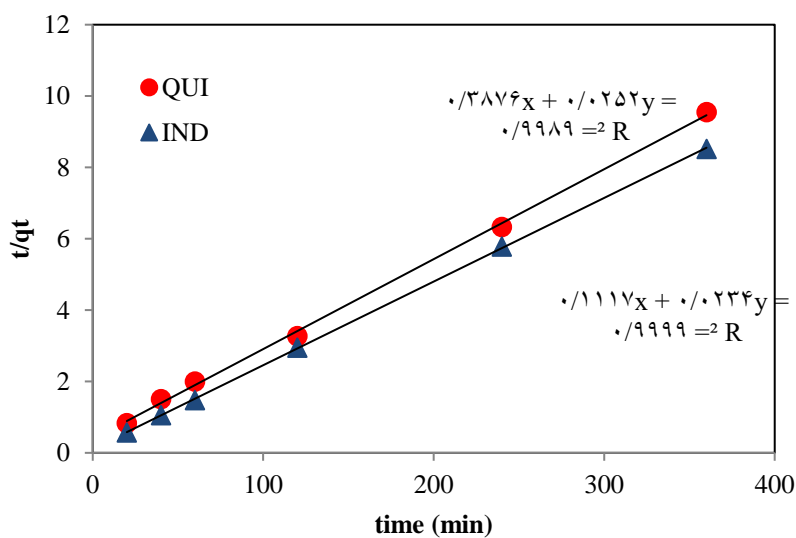
۷-۳- بررسی سینتیک نیتروژن زدایی جذبی

مطالعه سینتیک جذب برای توصیف نرخ جذب ترکیبات نیتروژنی ایندول و کینولین است که زمان ماند جذب در سطح مشترک جامد/محلول را کنترل می‌کند. برای تعیین سینتیک جذب ترکیبات نیتروژنی ایندول و کینولین بر روی کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو، از دو مدل سینتیکی شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم برای تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی استفاده شد. اثر ظرفیت جذب در یک دوره زمانی در بخش بررسی اثر پارامتر زمان بر جذب سطحی ارائه شده است. از شکل ۳، در مدت ۶ ساعت، می‌توان مشاهده کرد که اثر جذب به تدریج با توجه به زمان افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که بین دقیقه ۲۴۰ تا ۳۶۰ اثر جذب پایدار می‌شود. توضیح این امر این است که به حداکثر جذب یا حالت جذب تعادل رسیده است، به این ترتیب کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو دیگر نمی‌تواند نیتروژن را جذب کند، زیرا منافذ کربن کاملاً با مولکول‌های ترکیبات نیتروژنی ایندول و کینولین پر شده است. نموداری از q_t (mg/g) در مقابل t (min) در شکل ۸ برای سینتیک شبه مرتبه اول ترسیم شده است. برای سینتیک مرتبه دوم، نمودار t/q_t در برابر t (min) در شکل ۹ رسم شده است. با مقایسه گرافیکی دو نمودار، می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند جذب ترکیبات نیتروژنی ایندول و کینولین با استفاده از کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو به عنوان جذب از مدل شبه مرتبه دوم پیروی می‌کند.

پارامترهای سینتیکی با برازش منحنی غیرخطی تعیین شدند و نتایج در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. دریافت شد که داده‌های سینتیکی جذب سطحی به خوبی با مدل شبه مرتبه دوم مطابقت دارند. این بدین معناست که جذب سطحی ایندول و کینولین عمدتاً توسط برهمکنش‌های شیمیایی بین واکنشگرها انجام می‌شود [۵۲]. همچنین، ثابت سرعت برای جذب سطحی ایندول مقادیر بیشتری نسبت به کینولین داشت و سرعت جذب سطحی ایندول نسبت به کینولین بیشتر بود این امر نشان می‌دهد که نیروهای چسبندگی بیشتری بین ایندول و مکان‌های فعال جذب کربن فعال نسبت به کینولین وجود دارد [۵۳]. بنابراین، کربن فعال جذب بهتری برای ایندول نسبت به کینولین بود. مقادیر R^2 برای مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم ۰/۹۹۹۹ برای ایندول و ۰/۹۹۸۹ برای کینولین بود. مقادیر R^2 برای مدل سینتیکی شبه مرتبه اول ۰/۷۷۹۴ برای ایندول و ۰/۸۵۳۹ برای کینولین بود. بنابراین، رفتار جذب عمدتاً از مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم تبعیت می‌کند. جدول ۳ پارامترهای سینتیکی برای فرآیند جذب سطحی پیرامون کربن فعال سنتز شده برای ایندول و کینولین را نشان می‌دهد.



شکل ۸- مدل سینتیکی شبه مرتبه اول برای جذب سطحی ایندول و کینولین بر روی کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو



شکل ۹- مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم برای جذب سطحی ایندول و کینولین بر روی کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو

جدول ۳- پارامترهای سینتیکی برای فرآیند جذب سطحی پیرامون کربن فعال سنتز شده برای ایندول و کینولین

| شبه مرتبه دوم | | | شبه مرتبه اول | | | ترکیب نیتروژنی |
|----------------|-----------------------------------|------------------------------|----------------|-----------------------------------|--|----------------|
| R ² | q _e (cal.) (mg S/g) | K ₂ (g/mg.min) | R ² | q _e (cal.) (mg S/g) | K ₁ (min ⁻¹) | |
| ۰/۹۹۹۹ | ۸/۹۵۲۵ | ۰/۵۴۳ | ۰/۷۷۹۴ | ۳/۰۴۵ | ۰/۰۰۵۹ | ایندول |
| ۰/۹۹۸۹ | ۲/۲۵۷ | ۰/۲۵۵ | ۰/۸۵۳۹ | ۲/۱۳ | ۰/۰۰۲۶ | کینولین |

مکانیزم های مختلفی برای تشریح فرآیند جذب سطحی ایندول و کینولین نظیر تشکیل پیوند هیدروژنی، نیروهای واندروالس، برهمکنش اسید-باز، π -کمپلکس شدن و برهمکنش π - π پیشنهاد شده است [۵۴]. گزارش شده است که در کربن فعال، نیتروژن الکترونگاتیو می تواند با هر گروه قطبی بر روی سطح کربن یا با برهمکنش π - π بین حلقه آروماتیک کینولین و لایه های گرافیتی در کربن احاطه شود. همچنین، سطح گروه های اکسیژنی ماده کربنی همانند کربوکسیلیک و هیدروکسیل می توانند تشکیل پیوند هیدروژنی با نیتروژن را ارتقا دهند. Xiao و همکارانش [۵۵] گزارش کرده اند که جذب سطحی کینولین بر روی کربن فعال احتمالاً به علت برهمکنش های π - π و پیوند هیدروژنی نسبت به برهمکنش های قطبی با نیتروژن الکترونگاتیو بیشتر رخ دهد. علاوه بر این، پیوند هیدروژنی یکی از مکانیزم های اصلی برای جذب سطحی ترکیبات نیتروژنی خنثی مانند ایندول است [۵۶].

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده از ضایعات پوست سبز گردو کربن فعال سنتز شد. پارامترهای مختلف زمان، دما، دوز جاذب و غلظت اولیه ترکیب نیتروژنی کینولین و ایندول در فرآیند نیتروژن زدایی جذبی از سوخت مدل نرمال - هپتان بررسی شد. زمان یکی از پارامترهای مهم در حذف ترکیبات نیتروژنی بود. محیط ایجاد شده توسط مکان های فعال کربن فعال سنتز شده از پوست سبز گردو منجر به ظرفیت جذب $42/26$ ایندول و $37/68 \text{ mg.g}^{-1}$ کینولین در 360 دقیقه شد. افزایش دما منجر به کاهش ظرفیت جذب برای ترکیب ایندول و کینولین شد، هر چند این کاهش ظرفیت با شدت زیادی همراه نبود. با افزایش دما از 25 به 40°C ظرفیت جذب ایندول از $42/26$ به $39/09 \text{ mg.g}^{-1}$ جذب و برای کینولین از $38/68$ به $33/52 \text{ mg.g}^{-1}$ کاهش یافت. $0/05$ جاذب کربن فعال سنتز شده منجر به ظرفیت جذب $43/08$ و $41/79 \text{ mg.g}^{-1}$ برای ایندول و کینولین شد. با افزایش دوز جاذب از $0/03$ تا $0/05$ در ابتدا ظرفیت جذب افزایش یافت و پس از آن کاهش یافت. همچنین، برهمکنش بین ترکیب ایندول و جاذب کربن فعال سنتز شده در مقایسه با کینولین مؤثرتر بود و برای حذف ترکیب ایندول در مقایسه با ترکیب کینولین به دوز جاذب پایین تری نیاز بود. کربن فعال سنتز شده در غلظت های پایین تر (کمتر از 200 ppm برای ایندول و کینولین) سرعت جذب کمتری دارد. با افزایش غلظت به 200 ppm ظرفیت جذب ارتقا یافته و در غلظت های بالاتر کاهش می یابد. با این حال، در غلظت های اولیه بالای کینولین و ایندول (بالاتر از 200 ppm)، عملکرد کاتالیزوری به دلیل ارتباط مولکول های ایندول و کینولین در مورد مکان های جاذب کاهش یافت. طبق مقادیر مربع خطاها (R^2) میزان انطباق نتایج تجربی با مدل جذب لانگمویر مناسب می باشد. ترتیب مربع خطاها به صورت لانگمویر < فرندلیچ بود. بنابراین، می توان سطح جاذب را همگن و جذب را به صورت تک لایه در نظر گرفت به صورتی که مولکول های جذب شده ایندول و کینولین هیچ تعاملی با هم ندارند. همچنین، مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم رفتار سینتیکی را بهتر توصیف کرد.

۵- منابع

- [1] Bhadra, B.N., & Jhung, S.H., (2019). Oxidative desulfurization and denitrogenation of fuels using metal-organic framework-based/-derived catalysts, Applied Catalysis B: Environmental, 259, 118021. DOI: [10.1016/j.apcatb.2019.118021](https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.118021)
- [2] Ahmed, I., & Jhung, S.H., (2014). Adsorptive denitrogenation of model fuel with CuCl₂ loaded metal-organic frameworks (MOFs), Chemical Engineering Journal, 251, 35-42. DOI: [10.1016/j.cej.2014.04.044](https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.04.044)
- [3] Ahmed, I., Hasan, Z., Abedin Khan, N., & Hwa Jhung, S., (2013). Adsorptive denitrogenation of model fuels with porous metal-organic frameworks (MOFs): Effect of acidity and basicity of MOFs, Applied Catalysis B: Environmental, 129, 123-129. DOI: [10.1016/j.apcatb.2012.09.020](https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.09.020)

- [4] Shiraishi, Y., Tachibana, K., Hirai, T., & Komasaawa, I., (2002). Desulfurization and denitrogenation process for light oils based on chemical oxidation followed by liquid- liquid extraction, *Industrial & engineering chemistry research*, 41(17), 4362-4375. DOI:[10.1021/ie010618x](https://doi.org/10.1021/ie010618x)
- [5] Ahmed, I., Hasan, Z., Abedin Khan, N., & Hwa Jhung, S., (2013). Adsorptive denitrogenation of model fuels with porous metal-organic framework (MOF) MIL-101 impregnated with phosphotungstic acid: Effect of acid site inclusion, *Journal of hazardous materials*, 2013, 250, 37-44, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.01.024>.
- [6] Hernández-Maldonado, A.J. & R.T. Yang, (2004). Denitrogenation of transportation fuels by zeolites at ambient temperature and pressure, *Angewandte Chemie*, 116(8), 1022-1024. DOI:[10.1002/anie.200353162](https://doi.org/10.1002/anie.200353162)
- [7] Chen, X., Abdeltawab, A.A., Al-Deyab, S.S., Zhang, J., Yu, L., & Yu, Guangren., (2014). Extractive desulfurization and denitrogenation of fuels using functional acidic ionic liquids, *Separation and Purification Technology*, 133, 187-193. DOI:[10.1016/j.seppur.2014.06.031](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.06.031)
- [8] Ahmed, I. & S.H. Jhung, (2016). Adsorptive desulfurization and denitrogenation using metal-organic frameworks, *Journal of Hazardous materials*, 301, 259-276. DOI:[10.1016/j.jhazmat.2015.08.045](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.08.045)
- [9] Ishihara, A., Wang, D., Dumeignil, F., Hiroshi Amano, F., Weihua Qian, E., Kabe, T., (2005). Oxidative desulfurization and denitrogenation of a light gas oil using an oxidation/adsorption continuous flow process, *Applied Catalysis A: General*, 279(1-2), p. 279-287. DOI:[10.1016/j.apcata.2004.10.037](https://doi.org/10.1016/j.apcata.2004.10.037)
- [10] Kim, J.H., Hyung Kim, J., Ma, X., Zhou, A., & Song, C., (2006). Ultra-deep desulfurization and denitrogenation of diesel fuel by selective adsorption over three different adsorbents: A study on adsorptive selectivity and mechanism, *Catalysis Today*, 111(1-2), 74-83. DOI: [10.1016/j.cattod.2005.10.017](https://doi.org/10.1016/j.cattod.2005.10.017)
- [11] Bhadra, B.N., Song, J.Y., Uddin, N., Khan, N.A. Kim, S., Choi, C.H., & Jhung, S.H., (2019). Oxidative denitrogenation with TiO₂@ porous carbon catalyst for purification of fuel: Chemical aspects, *Applied Catalysis B: Environmental*, 240, 215-224. DOI:[10.1016/j.apcatb.2018.09.004](https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.09.004)
- [12] Ja'fari, M., S.L. Ebrahimi, & M.R. Khosravi-Nikou, (2018). Ultrasound-assisted oxidative desulfurization and denitrogenation of liquid hydrocarbon fuels: A critical review, *Ultrasonics sonochemistry*, 40, 955-968. DOI:[10.1016/j.ultsonch.2017.09.002](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.09.002)
- [13] Eltaweil, A.S., Elshishini, H.M., Ghatass, Z.F., & Elsubruiti, G.M., (2021), Ultra-high adsorption capacity and selective removal of Congo red over aminated graphene oxide modified Mn-doped UiO-66 MOF, *Powder technology*, 379, 407-416. DOI:[10.1016/j.powtec.2020.10.084](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.10.084)
- [14] Subhan, S., Yaseen, M., Ahmad, B., Tong, Z., Subhan, F., Ahmad, W., Sahibzada, & M., (2021). Fabrication of MnO₂ NPs incorporated UiO-66 for the green and efficient oxidative desulfurization and denitrogenation of fuel oils, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105179. DOI:[10.1016/j.jece.2021.105179](https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105179)
- [15] Sarker, M., H.J. An, & S.H. Jhung, (2018). Adsorptive removal of indole and quinoline from model fuel over various UiO-66s: quantitative contributions of H-bonding and acid-base interactions to adsorption, *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(8), 4532-4539. DOI:[10.1016/j.jhazmat.2017.10.041](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.041)
- [16] Nowicki, P., J. Kazmierczak, & R. Pietrzak, (2015). Comparison of physicochemical and sorption properties of activated carbons prepared by physical and chemical activation of cherry stones, *Powder technology*, 26, 312-319. DOI:[10.1016/j.powtec.2014.09.023](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.09.023)
- [17] Attia, A.A., B.S. Girgis, & N.A. Fathy, (2008). Removal of methylene blue by carbons derived from peach stones by H₃PO₄ activation: batch and column studies, *Dyes and pigments*, 76(1), 282-289. DOI:[10.1016/j.dyepig.2006.08.039](https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.08.039)
- [18] Wu, F.-C., R.-L. Tseng, & R.-S. Juang, (1999). Pore structure and adsorption performance of the activated carbons prepared from plum kernels, *Journal of Hazardous Materials*, 69(3), 287-302. DOI:[10.1016/j.jcis.2005.02.033](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.02.033)
- [19] Angin, D., (2014). Production and characterization of activated carbon from sour cherry stones by zinc chloride, *Fuel*, 115, 804-811, DOI:[10.1016/j.fuel.2013.04.060](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.060)
- [20] Jahangiri, M., Shahtaheri, S.J., Adl, J., Rashidi, A., Kakooei, H., Forushani, A.R., Nasiri, G., Ghorbanali, A., Ganjali, M.R., (2012). Preparation of activated carbon from walnut shell and its utilization for manufacturing organic-vapour respirator cartridge, *Fresenius environmental bulletin*, 21(6), 1508-1514.
- [21] Liu, J., Meng, M., Li, C., Huang, X., & Di, D. (2008). Simultaneous determination of three diarylheptanoids and an α -tetralone derivative in the green walnut husks (*Juglans regia* L.) by high-performance liquid chromatography with photodiode array detector. *Journal of Chromatography A*, 1190(1-2), 80-85.
- [22] Misra, P., Badoga, S., Chenna, A., Dalai, A.K., & Adjaye, J., (2017). Denitrogenation and desulfurization of model diesel fuel using functionalized polymer: charge transfer complex formation and adsorption isotherm study. *Chemical Engineering Journal*, 325, 176-187. DOI:[10.1016/j.cej.2017.05.033](https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.05.033)

- [23] Bereyhi, M., Zare-dorabi, R., & Mosavi, S.H., (2020). Microwave-assisted synthesis of CuCl-MIL-47 and application to adsorptive denitrogenation of model fuel: response surface methodology, *ChemistrySelect*, 5, 14583-14591. <https://doi.org/10.1002/slct.202003873>.
- [24] Seo, P.W., Ahmed, I., & Jhung, S.H., (2016). Adsorptive removal of nitrogen-containing compounds from a model fuel using a metal-organic framework having a free carboxylic acid group, *Chemical Engineering Journal*, 299, 236-243. DOI:[10.1016/j.cej.2016.04.060](https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.060)
- [25] Ahmed, I., & Jhung, S.H., (2015). Effective adsorptive removal of indole from model fuel using a metal-organic framework functionalized with amino groups, *Journal of Hazardous Materials*, 283, 544-550. DOI:[10.1016/j.jhazmat.2014.10.002](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.10.002).
- [26] Igwegbe, C.A., Ighalo, J.O., Ghosh, S., Ahmadi, S., Ugonabo, V.I., (2023). Pistachio (*Pistacia vera*) waste as adsorbent for wastewater treatment: a review, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 8793-8811. DOI:[10.1007/s13399-021-01739-9](https://doi.org/10.1007/s13399-021-01739-9)
- [27] Ho, Y.S., & McKay, G., (1999). Pseudo-second order model for sorption processes, *Process Biochemistry*, 34, 451-465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)
- [28] Uzosike, A.O., Ofudje, E.A., Akiode, O.K., Ikenna, C.V., Adeogun, A.I., Akinyele, J.O., & Idowu, M.A., (2022). Magnetic supported activated carbon obtained from walnut shells for bisphenol-a uptake from aqueous solution, *Applied Water Science*, 12(8), 1-16. DOI:[10.1007/s13201-022-01724-1](https://doi.org/10.1007/s13201-022-01724-1)
- [29] Sofyan, N., Alfaruq, S., Zulfia, A., & Subhan, A. (2018). Characteristics of vanadium doped and bamboo activated carbon coated LiFePO₄ and its performance for lithium ion battery cathode. *Jurnal Kimia dan Kemasan*, 40(1), 9-16.
- [30] Ghasemi M., Ghoreyshi, A.A., Younesi, H., & Khoshhal, S., (2015). Synthesis of a high characteristics activated carbon from walnut shell for the removal of Cr (VI) and Fe (II) from aqueous solution: single and binary solutes adsorption, *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 12(4), 28-51.
- [31] Davidi, S., Lashanizadegan, A., Sharififard, H., (2019). Walnut shell activated carbon: optimization of synthesis process, characterization and application for Zn (II) removal in batch and continuous process, *Materials Research Express*, 6, 085621 DOI [10.1088/2053-1591/ab213e](https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab213e).
- [32] Li, X., Qiu, J., Hu, Y., Ren, X., He, L., Zhao, N., Ye, T., & Zhao, X., (2020). Characterization and comparison of walnut shells-based activated carbons and their adsorptive properties, *Adsorption Science & Technology*, 38(9-10), 450-463. <https://doi.org/10.1177/0263617420946524>
- [33] Yaman, M., & Demirel, H.M., (2020). Synthesis and characterization of activated carbon from biowaste-walnut shell and application to removal of uranium from waste, *Pollution*, 6(4), 935-944. DOI: [10.22059/POLL.2020.303546.828](https://doi.org/10.22059/POLL.2020.303546.828).
- [34] Xie, R., Wang, H., Chen, Y., & Jiang, W., (2013). Walnut Shell-Based Activated Carbon with Excellent Copper (II) Adsorption and Lower Chromium (VI) Removal Prepared by Acid-Base Modification, 32 (3), 688-696. <https://doi.org/10.1002/ep.11686>
- [35] Yu, L., Zhang, Y., Hudak, B.M., Wallace, D.K., Kim, D.Y., Guiton, B.S., (2016). Simple synthetic route to manganese-containing nanowires with the spinel crystal structure, *J. Solid State Chem*, 240, 23-29. DOI:[10.1016/j.jssc.2016.05.012](https://doi.org/10.1016/j.jssc.2016.05.012)
- [36] Wang, X., Fan, H., Shen, P., Yao, Y., Chen, Y., Lu, S., Teng, B., Liao, X., (2021). Utilizing Ti-MOF crystals' defects to promote their adsorption and the mechanism investigation, *Microporous and Mesoporous Materials*, 327, 111402. DOI:[10.1016/j.micromeso.2021.111402](https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111402)
- [37] Thaligari, S. K., Gupta, S., Srivastava, V. C., & Prasad, B. (2016). Simultaneous desulfurization and denitrogenation of liquid fuel by nickel-modified granular activated carbon. *Energy & Fuels*, 30(7), 6161-6168. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00579>
- [38] Ahmed, I., Khan, N.B., Yoon, J.W., Chang, J.S., & Jhung, S.H., (2017). Protonated MIL-125-NH₂: remarkable adsorbent for the removal of quinoline and indole from liquid fuel, *ACS applied materials & interfaces*, 9(24), 20938-20946. DOI: [10.1021/acsami.7b01899](https://doi.org/10.1021/acsami.7b01899)
- [39] Mirzaie, A., Musabeygi, T., & Afzalnia, A., (2017). Sonochemical synthesis of magnetic responsive Fe₃O₄@TMU-17-NH₂ composite as sorbent for highly efficient ultrasonic-assisted denitrogenation of fossil fuel, *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 664-671. DOI:[10.1016/j.ultsonch.2016.08.013](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.08.013).
- [40] Tong, M., Jun, J. W., Zhong, C., Jhung, S. H., (2016). Adsorption of nitrogen-containing compounds from model fuel over sulfonated metal-organic framework: contribution of hydrogen-bonding and acid-base interactions in adsorption, *The Journal of Physical Chemistry C*, 120(1), 407-415. DOI:[10.1021/acs.jpcc.5b10578](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b10578)

- [41] Foo, K. Y., Lee, L. K., & Hameed, B. H. (2013). Preparation of banana frond activated carbon by microwave induced activation for the removal of boron and total iron from landfill leachate. *Chemical Engineering Journal*, 223, 604-610. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.03.009>
- [42] Anisuzzaman, S. M., Krishnaiah, D., & Alfred, D. (2018, February). Adsorption potential of a modified activated carbon for the removal of nitrogen containing compounds from model fuel. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1930, No. 1). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/1.5022907>
- [43] Hiwarkar, A. D., Srivastava, V. C., & Mall, I. D. (2014). Simultaneous adsorption of nitrogenous heterocyclic compounds by granular activated carbon: parameter optimization and multicomponent isotherm modeling. *Rsc Advances*, 4(75), 39732-39742. <https://doi.org/10.1039/C4RA06395C>
- [44] Qu, D., Feng, X., Li, N., Ma, X., Shang, C., & Chen, X. D. (2016). Adsorption of heterocyclic sulfur and nitrogen compounds in liquid hydrocarbons on activated carbons modified by oxidation: capacity, selectivity and mechanism. *RSC advances*, 6(48), 41982-41990. <https://doi.org/10.1039/C6RA06108G>
- [45] Hiwarkar, A. D., Srivastava, V. C., & Mall, I. D. (2015). Comparative studies on adsorptive removal of indole by granular activated carbon and bagasse fly ash. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 34(2), 492-503. <https://doi.org/10.1002/ep.12025>
- [46] Thaligari, S. K., Srivastava, V. C., & Prasad, B. (2017). Binary isotherm modeling for simultaneous desulfurization and denitrogenation of model fuel by zinc loaded activated carbon. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 15(3), 20150216. <https://doi.org/10.1515/ijcre-2015-0216>
- [47] Thaligari, S. K., Gupta, S., Srivastava, V. C., & Prasad, B. (2016). Simultaneous desulfurization and denitrogenation of liquid fuel by nickel-modified granular activated carbon. *Energy & Fuels*, 30(7), 6161-6168. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00579>
- [48] Han, X., Lin, H., & Zheng, Y. (2015). Adsorptive denitrogenation and desulfurization of diesel using activated carbons oxidized by (NH₄)₂S₂O₈ under mild conditions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 93(3), 538-548. <https://doi.org/10.1002/cjce.22132>
- [49] Arcibar-Orozco, J. A., & Rangel-Mendez, J. R. (2013). Model diesel denitrogenation by modified activated carbon with iron nanoparticles: Sulfur compounds effect. *Chemical engineering journal*, 230, 439-446. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.102>
- [50] Rameshraj, D., Srivastava, V. C., Kushwaha, J. P., & Mall, I. D. (2018). Competitive adsorption isotherm modelling of heterocyclic nitrogenous compounds, pyridine and quinoline, onto granular activated carbon and bagasse fly ash. *Chemical Papers*, 72, 617-628. <https://doi.org/10.1007/s11696-017-0321-6>
- [51] Anisuzzaman, S. M., & Kamarulzaman, M. S. (2021). Removal of Nitrogen Containing Compounds From Fuel Using Modified Activated Carbon. *Transactions on Science and Technology*, 8(1), 38-44.
- [52] Abdelhameed, R. M., el-deib, H. R., El-Dars, F. M., Ahmed, H. B., & Emam, H. E. (2018). Applicable strategy for removing liquid fuel nitrogenated contaminants using MIL-53-NH₂@ natural fabric composites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(44), 15054-15065. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b03936>
- [53] Khan, N. A., Shin, S., & Jhung, S. H. (2020). Cu₂O-incorporated MAF-6-derived highly porous carbons for the adsorptive denitrogenation of liquid fuel. *Chemical Engineering Journal*, 381, 122675. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122675>
- [54] Ahmed, I., Khan, N. A., & Jhung, S. H. (2017). Adsorptive denitrogenation of model fuel by functionalized UiO-66 with acidic and basic moieties. *Chemical Engineering Journal*, 321, 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.093>
- [55] Xiao, J., Song, C., Ma, X., & Li, Z. (2012). Effects of aromatics, diesel additives, nitrogen compounds, and moisture on adsorptive desulfurization of diesel fuel over activated carbon. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(8), 3436-3443. <https://doi.org/10.1021/ie202440t>
- [56] Ahmed, I., Tong, M., Jun, J. W., Zhong, C., & Jhung, S. H. (2016). Adsorption of nitrogen-containing compounds from model fuel over sulfonated metal-organic framework: contribution of hydrogen-bonding and acid-base interactions in adsorption. *The Journal of Physical Chemistry C*, 120(1), 407-415. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b10578>

Adsorptive denitrogenation of fuel with the help of biological adsorbent prepared from green walnut skin

Amin Alamdari^{1*}, Sadra Rostami, Abbas aghaeinejad Meybodi

- 1- Department of Chemical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, amin.alamdari@urmia.ac.ir
- 2- BSc student, Chemical Engineering, Urmia University, Urmia, sadrarostami.1918@gmail.com
- 3- Department of Chemical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, a.aghaeinejad@urmia.ac.ir

Abstract: The aim of this research is to study the effect of activated carbon synthesized from green walnut skin on the activity of the adsorption process to remove the nitrogen compounds of indole and quinoline from model fuel. The synthesized adsorbent was analyzed using XRD, FTIR and BET methods. Process parameters such as time, temperature, initial concentration of nitrogen compounds and adsorbent dose were investigated on the adsorptive denitrification process. The results of the surface adsorption process showed that the activated carbon adsorbent synthesized from the green skin of walnut, 200 ppm of indole and quinoline in a period of six hours, with a adsorbent amount of 0.05 g per 10 ml of normal - heptane fuel containing quinoline and indole at 25 °C removes 42.26 and 37.68 mg.g⁻¹, respectively. Pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetic models were used to investigate adsorption kinetics, while adsorption isotherms were used to evaluate equilibrium data. It was found that the adsorption of nitrogenous compounds by the synthesized activated carbon has the best fit with the Langmuir isotherm for quinoline and indole with the maximum adsorption capacity of 39.52 and 44.64 mg.g⁻¹. Based on the experimental data, the pseudo-second order model showed the best fit for quinoline and indole with linear regression (R²) of 0.9989 and 0.9999. From isothermal studies and adsorption kinetics, it was proved that the activated carbon synthesized from the green skin of walnut shows a great potential in removing nitrogenous compounds.

Keywords: Denitrogenation, Indole, Quinoline, Fuel, Activated carbon, Walnut green skin.